

平成21年3月24日現在

研究種目：若手研究（B）
研究期間：2007～2008
課題番号：19760330
研究課題名（和文） 競合吸着を考慮した地盤の化学性の不均一分布が巨視的分散におよぼす影響
研究課題名（英文） Effects of chemical heterogeneity on macroscopic dispersion by accounting for the competitive sorption
研究代表者
中川 啓 (NAKAGAWA KEI)
鹿児島大学・農学部・准教授
研究者番号：90315135

研究成果の概要：

地下水汚染や高レベル放射性廃棄物の地層処分などを検討する際に、対象物質の地下水での拡がりや滞留を決定する重要なパラメータとして分散長がある。本研究は、化学的特性の不均一分布まで考慮に入れた分散長について、具体的な現象を調べるとともに、分散長の評価方法を確立することである。室内実験と数値計算を実施し、分散長評価において物理的特性のみならず化学的特性の不均一分布を考慮に入れる重要性を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度			
2005年度			
2006年度			
2007年度	2,300,000	0	2,300,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,300,000	300,000	3,600,000

研究分野：地盤環境工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：反応輸送モデル、数値計算、不均一場、物質輸送、地下水・土壌汚染、室内実験、分散長・分散係数

1. 研究開始当初の背景

近年、有害物質による地下水・土壌汚染が広く報告されている。帯水層中や土壌間隙中に溶存している物質や土壌より溶出した物質は、地下水の流れにより輸送され地下環境中に拡がること知られており、汚染の現況評価や修復評価において数値シミュレーションを行う際には現場の分散長を適切に与えることが重要である。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、処分場からの放射性物質の漏洩シナリオについて事前に十分検討しておく必要がある。この場合、やはり岩盤中の地下水流れと物質輸送を

検討する際には、慎重に分散長を設定する必要がある。以上のように、分散長は帯水層の重要な特性値である。

この分散長は、一般に現場スケールでは、現地トレーサ試験の結果であるブレイクスルーカーブ（破過曲線）を用いて、移流分散方程式の解析解とのフィッティングにより決定される。分散長はスケールに依存することが広く知られており、現場のスケールや解析のスケールに応じて設定されることも多い。

研究代表者は、透水性の不均一分布にもとづく巨視的分散メカニズムについて室内実験と数値シミュレーションにより説明した

(中川ら, 地下水学会誌, 40(1), 1998). 分散長を規定するスケールの定義が曖昧であることを指摘し, スケールとして場の積分特性距離を適用することを提案し, 積分特性距離の3倍程度の距離を物質が流下すれば, 一定の分散長を適用できることを示し(中川ら, 水工学論文集, 42, 1998), 十分な距離がとれない場において, 透水係数分布を推定する方法を提案し, 現場適用を行った(中川・神野, 地下水学会誌, 40(4), 1998, 土木学会論文集, 656(II-52), 2000).

しかしながら, 以上のような従来の研究は, 主に透水係数の不均一性にもとづく分散長について検討したものであり, 対象とする有害物質は, ほとんどは周囲の土壤構成物質や岩盤割れ目に充填されている粘土鉱物などへの吸着・脱着を伴うことが予想され, 分散長はより大きくなると考えられる. よって研究代表者はすでにその可能性を数値的に検討した(中川ら, 水工学論文集, 50, 2006). しかし化学性の分布による分散長の拡大傾向を説明するには未だ不十分であり, 実験的には検証されていない. 従来の研究においては, 化学性の影響については単一物質の吸着を考慮し解析的に検討しただけであり, 実際に起こりうる関係物質間の競合吸着を考慮していない.

2. 研究の目的

前述のように地下水汚染や高レベル放射性廃棄物の地層処分などを検討する際に, 対象物質の地下水中での拡がりやを決定する重要なパラメータとして分散長があるが, その分散長の評価において化学性の不均一分布などを考慮していないなど不十分な点が残されている. したがって本研究の目的は, 化学的特性の不均一分布まで考慮に入れた分散長について, 具体的な現象を調べるとともに, 分散長の評価方法を確立することである.

3. 研究の方法

(1) 物理的・化学的不均一性を考慮した室内実験

2007年度は, 研究実施計画に沿って, まず物理的および化学的不均一性を考慮した水・溶質移動特性を把握するための室内実験を実施した. 実験装置は, 5 x 5 x 10cmの均一ブロックを2次元的に10 x 10配置し, それぞれのブロック内は同一粒径の試料(土および砂)を充填, 実験浸透層全体は5種類の試料を不均一に配置した(図-1参照). 不均一性は文献値を参考に, 現実味のある透水係数の平均値と分散を与えて統計的な発生方

法によった. 実験装置にはプリント基板製TDRプローブを設置し, 土壌水分および電気伝導度の時間的変化を測定した. 実験浸透層には, 上部から食紅で着色したKCl溶液を供給した. 溶液の供給方法は降雨発生装置による一定のフラックスによるものとした. KCl溶液の見かけの浸透の様子は, 所定の時間毎にデジタルカメラによる撮影を実施した.

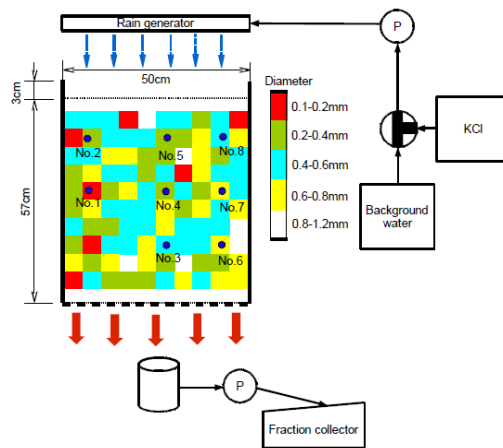


図-1 室内実験装置の概要

(2) 物理的・化学的不均一性を考慮した数値計算

2008年度は, 前年度の室内実験結果をふまえ, 物理的・化学的不均一性を考慮した水・物質の移動特性を把握するための反応輸送コードMIN3Pによる実験の再現を試みた.

続いてMIN3Pの妥当性が確認された上で図-2に示すような水理・化学パラメータの統計的分布特性の異なる2種類の場を生成し, それらに対するKCl溶液の投入シミュレーションを実施し, 両者を比較を行い数値実験的に検討した.

また複雑な入力ファイルを要する反応輸送コードMIN3Pを用いることは別に, より簡便な評価方法を検討するため, 前年度の実験結果をCTR(連続時間ランダムウォーク)により再現することを試みた.

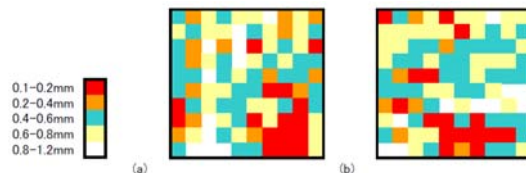


図-2 数値実験で検討した2種類の不均一場

4. 研究成果

物理的・化学的不均一性を考慮した室内実験および反応輸送コードによる実験の再現を行い, 以下のような結果が得られた.

- (1) 室内実験において、物理的特性である透水係数と化学的特性である陽イオン交換容量や陰イオン交換容量との間に線形関係があることが分かった。
- (2) 飽和透水係数の不均一性による物質輸送への影響を検討する際には、それと明らかな相関をもって変動する陽イオン交換容量や陰イオン交換容量の影響も考慮に入れるべきであると考えられる。
- (3) 特に陽イオン交換に着目したが、陽イオン交換容量や陰イオン交換容量といった吸着特性の大小の分布が物質輸送に影響を与えるため、吸着性物質の移動に関するモデル化にあたっては、このことを考慮する必要がある。
- (4) 着色 KCl 溶液の浸透実験における流出溶液の K⁺と Cl⁻の破過曲線では、それぞれのピークが分かれており、これは浸透場の不均一性の影響を受けたと考えられる。
- (5) 注入した K⁺は Cl⁻に比べて、明らかに遅れて流出しており、固相への吸着が効いていることが分かる。
- (6) 反応輸送コードによる Cl⁻の輸送の時間変化は、デジタルカメラで撮影されたものや電気伝導度の実測値と類似しており、また下端における破過曲線も概ね実験結果と一致しており、MIN3P による計算の妥当性が確認された(図-3, 4および図-5 参照)。

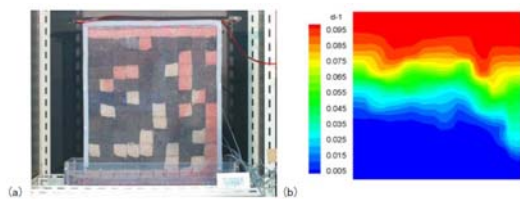


図-3 7 時間後の着色した KCl の挙動と Cl⁻ [M] の計算結果の比較, (a) 実験結果, (b) 計算結果

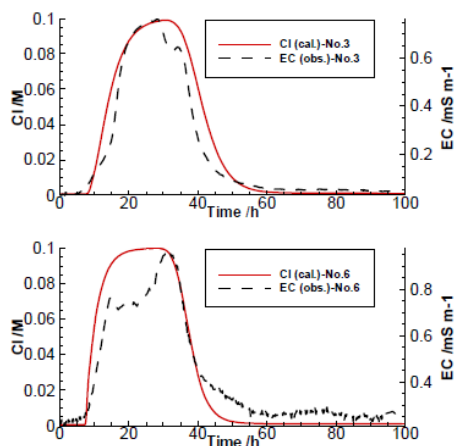


図-4 任意の測定点における数値計算と実験の破過曲線

- (7) 性質の異なる 2 種類の不均一場に対する数値実験的検討によると、浸透層下端からの流出液の破過曲線は、両者でほぼ同じであったが(図-6 参照)、液相および固相のイオン分布を比較すると、配置した粒径ブロックにそれぞれ対応した濃度分布を示した。
- (8) 実験で得られた破過曲線を再現することに CTRW を適用できる可能性があることが分かった(図-7 参照)。

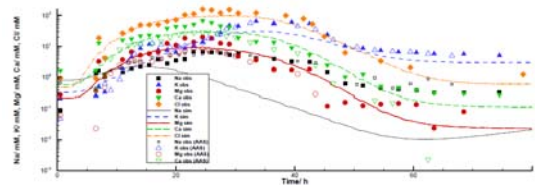


図-5 浸透層下端における各成分の破過曲線(数値計算:実線, 実測値:シンボル)

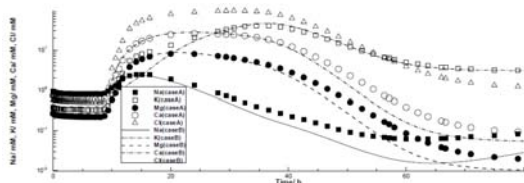


図-6 数値実験による 2 種類の不均一場で得られた破過曲線

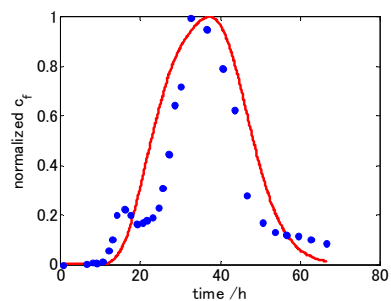


図-7 K⁺の破過曲線の CTRW による再現(CTRW モデル:実線, 実測値:シンボル)

ここで得られた成果から、地下水汚染が起きているような現場で、反応輸送シミュレーションにより汚染の拡がり把握する際には、場の特性を把握し、不均一場を生成した上で当該汚染に係わる反応を考慮した計算を行うことが必要であることが分かった。

またこのような土壌や地層の物理的-化学的不均一性による物質輸送に与える影響を検討することは、地下水・土壌汚染分野のみならず、廃棄物処分場の浸出水の水質形成に関する問題や、高レベル放射性廃棄物の処分における漏洩シナリオの検討などへ有益な

示唆を与えると考えられる。例えば廃棄物の埋立処分を行う際に、不均一になることは避けられないが、計画的に埋立を行うことで廃棄物層内の水の流れや反応をコントロールできる可能性があり、今後そのような分野にも応用していきたいと考える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- 1) 中川 啓・前川陽介ほか1名：物理的-化学的不均一場における陽イオン交換反応を考慮した物質輸送シミュレーション, 水工学論文集, 53, 2009, 517-522, 査読有.
- 2) 中川 啓:物質の移流分散現象における微視的分散と巨視的分散について, 地下水学会誌, 50, 2008, 179-186.
- 3) K. Nakagawa, K. Momii ほか1名: Experimental and numerical study on nitrate transport process through volcanic ash soil, IAHS Publication, 324, 2008, 71-78, 査読有.
- 4) 中川 啓・天本 茜ほか2名:物理的-化学的不均一場における陽イオン交換容量を考慮した物質輸送実験, 水工学論文集, 52, 2008, 397-402, 査読有.
- 5) 中川 啓・齋藤雅彦:不飽和-不均一場における水動動態解析, 土木学会論文集 B, 64(1), 2008, 30-40, 査読有.

[学会発表] (計9件)

- 1) 中川 啓・前川陽介ほか1名:物理的-化学的不均一場における陽イオン交換反応を考慮した物質輸送シミュレーション, 第53回水工学講演会, 2009年3月6日, 芝浦工業大学(東京都).
- 2) 中川 啓・森 裕樹ほか1名:CTRWによる不均一場における反応輸送実験の破過曲線の再現, 日本地下水学会2008年秋季講演会, 2008年11月21日, 九州大学(福岡市).
- 3) 中川 啓:CTRWの不均一場反応輸送実験への適用, 第9回地下環境水文学に関する研究集会, 2008年11月2日, 法政大学(東京都).
- 4) 中川 啓・前川陽介ほか1名:物理的-化学的不均一場における陽イオン交換反応を考慮した物質輸送解析, 日本地下水学会2008年春季講演会, 2008年5月24日, 東京農工大学(東京都).
- 5) 中川 啓・天本 茜ほか2名:物理的-化学的不均一場における陽イオン交換反応を考慮した物質輸送実験, 第52回水工学講演会, 2008年3月7日, 広島大学(広島県).

- 6) 中川 啓:不均一場における不飽和鉛直浸透過程の室内実験と数値シミュレーション, 第8回土木学会水工学委員会水文部会地下環境水文学研究集会, 2007年11月23日, 和歌山大学(和歌山県).
- 7) 西垣 誠・中川 啓ほか3名:原位置トレーサ試験の理論及び試験方法に関する最近の研究動向, 日本地下水学会2007年秋季講演会, 2007年11月2日, 長野市若里市民文化ホール(長野県).
- 8) 関岡洋志・中川 啓ほか2名:プリント基板TDRプローブを用いた不飽和・不均一場における電気伝導度測定, 第88回農業農村工学会九州支部講演会, 2007年10月18日, ルネッサンスホテル創世(佐賀県).
- 9) 中川 啓:鉛汚染土壌の酸洗浄におよぼす土壌の不均一性の影響, 金沢大学環日本海域環境研究センターセミナー「土壌の不均一性の解析とその汚染対策への応用」, 2007年6月29日, 金沢大学(石川県).

[図書] (計1件)

- 1) 中川 啓ほか19名:地盤工学会(発行)丸善(発売), 地盤工学・実務シリーズ25続・土壌・地下水汚染の調査・予測・対策, 2008, 152.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 啓 (NAKAGAWA KEI)

鹿児島大学・農学部・准教授

研究者番号: 90315135